

نشریه مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/


انجمن بتن ایران


انجمن مهندسی روسازی ایران

تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM تحت بار ضربه با استفاده از روش اجزای محدود*

یادداشت پژوهشی

مجتبی شهرکی[۱] فرزاد شهابیان مقدم[۲]

DOI: 10.22067/jfcei.2023.79505.1189

چکیده *شناخت رفتار تغییرشکل‌های بزرگ پوسته‌های استوانه‌ای مرکب چندلایه (MLC) با هسته مواد هدفمند (FGM) که دارای ضخامت کم هستند در برابر بارهای ضربه‌ای، مهم می‌باشد. در این پژوهش به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای اثرگذار (شاخص توان حجمی مواد هدفمند، نحوه قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های مواد مرکب) بر روی پاسخ دینامیکی پوسته مورد نظر تحت بار ضربه پرداخته می‌شود. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته استوانه‌ای به روش المان محدود توسط مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است و اثر شاخص توان حجمی هسته FGM و پارامترهای اثرگذار مواد مرکب چندلایه همچون نوع لایه‌ها شامل پلیمر تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) و پلیمر تقویت شده با الیاف کربن (CFRP)، زوایه قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییرمکان پوسته کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که بیشینه تغییرمکان در پوسته CFRP/FGM/CFRP با هسته تمام فلزی و کمینه تغییرمکان در پوسته GFRP/FGM/GFRP با هسته تمام سرامیکی اتفاق می‌افتد. بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری لایه‌ها نشان می‌دهد که انتخاب زوایه قرارگیری ۱۵ درجه، موجب وقوع تغییرمکان کمتری می‌گردد و همچنین با افزایش تعداد لایه‌ها، کاهش تغییرمکان مشاهده می‌شود.*

واژه‌های کلیدی مواد مرکب چندلایه، مواد هدفمند، پوسته استوانه‌ای، تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی، بار ضربه.

Geometric Nonlinear Dynamic Analysis of MLC Cylindrical Shells with FGM Core under Impact Load using by Finite Element Method

Mojtaba Shahraki Farzad Shahabian Moghadam

Abstract *In recent decades, shells made of composite materials have been used in modern structures under impact load. Multi-Layer Composites (MLC) and Functionally Graded Materials (FGMs) are the upgrades of composites that have been considered due to their suitable mechanical properties such as high resistance to weight ratio, flexibility and impact resistance. In this research, geometric nonlinear dynamic behavior on multilayer composite cylindrical shells with FGM core under impact load has been analyzed; because it is necessary to know how structures made of these materials behave under such loads. For this purpose, the effect of FGM core volume fraction index and the effective parameters of multi-layer composites such as the angles of the layers and the number of layers have been investigated. The results of this study show that by increasing the volume fraction index, the maximum displacement of the shell decreases. The maximum displacement occurs in the CFC (CFRP/FGM/CFRP) shell with pure metal FGM and the minimum displacement occurs in the GFG shell with pure ceramic FGM. Evaluation of the different positions of the layers shows that selecting a 15-degree positioning angle causes less displacement and also decreases the displacement as the number of layers increases.*

Keywords Multi-Layer Composites (MLC), Functionally Graded Material (FGM), Cylindrical Shell, Geometric nonlinear dynamic analysis, Impact Load.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۲/۲۴ می‌باشد

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استاد گروه مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

Email: shahabf@um.ac.ir

مقدمه

پوسته‌های ساخته شده از مواد مرکب کاربردهای متنوعی دارنـد. این پوسته‌ها معمولا در صنایع فضایی، نظـامی، حمـل و نقـل و ساخت و سازهای عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پوسته‌ها دارای ضخامت کم و سطحی گسـترده هسـتند و زمـانی کـه در معرض بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند دچـار تغییـر شـکل‌هـای زیادی می‌گردند.

امروزه مواد هدفمند به‌عنوان موادی با مقاومت حرارتی بالا و تنش‌های حرارتی پایین شهرت یافته‌اند. کاربرد ایـن مـواد در سازه‌هایی که تحت ضربه و شوک‌های حرارتی قرار مـی‌گیرنـد، مرسوم است. بور و دیووز [1] بـا الهـام از نحـوه سـاخت مـواد مرکب گرادیانی که خواص مکانیکی آنها در راستای مـورد نظـر با شیب ملایمی تغییر می‌کند، ایده‌ای را برای استفاده از تغییرات تدریجی و پیوسته در مواد ارائه دادند. پـس از آن، یـک تحقیـق گسترده در زمینه مـواد بـا تغییـر عملکـرد تـدریجی بـه وسـیله کوزومی و همکـاران [2] در آزمایشـگاه هوافضـای ژاپـن بـرای تولید مواد مقاوم در برابر حرارت آغاز شد که با ساخت پوسته FGM (Functionally Graded Material) کروی برای نوک موشک اتمام یافت. هورگان و چان [3] به بررسی اثرات ناهمگنی مـواد (FGM) بر پاسـخ اسـتوانه‌هـا و دیسـک‌هـای دایـره‌ای توخـالی همسانگرد خطی الاستیک پرداختند که تحـت فشـار داخلـی یـا خارجی یکنواخت می‌باشند. بدین منظور، معادله‌هـای حـاکم را در حالت کرنش صفحه‌ای با توزیع توانی ضـریب کشسـانی در راستای شعاعی به کمک معادلـه‌هـای لامـه اسـتخراج کردنـد و مشاهده شد که تنش‌های ایجاد شده در استوانه و دیسک FGM به طور قابل توجهی با حالت همگن متفاوت اسـت. بـه عنـوان مثال، حداکثر تنش حلقه‌ها، برخلاف مواد همگن، بر روی سطح داخلی رخ نمی‌دهد.

اگرچه تاکنون تحقیقات فراوانـی در زمینـه ضـربه بـر روی صفحات مرکب انجـام شـده اسـت، لـیکن اثـر ضـربه بـر روی پوسته‌های استوانه‌ای مرکب کمتر مورد توجه قرار گرفته اسـت. توتونسو و ازترک [4] رفتار سازه‌های گرادیانی و مشخص‌کردن روش‌های تحلیلی برای بررسی تنش‌ها در وسایل شکست‌پـذیر را مورد بررسی قرار داده و با استفاده از روش تحلیلـی، روابـط دقیقی برای تنش‌ها در سازه‌های فشاری گرادیانی ارائه کرده‌انـد که ویژگی و نوآوری بارز این کار محسوب می‌شـود. از طرفـی دیگر محدودیت در مدل‌سازی سازه‌هـای گرادیـانی و عـدم در نظر گرفتن عوامل بیرونی مانند حرارت و فشار در مـدل‌سـازی تنش‌ها از ضعف‌های این کار می‌باشد. در ایـن مقالـه، از تـابعی برای توزیع متغیرهای مکانیکی در سازه استفاده شده است که به صورت خطی و صعودی تغییر می‌کند و نتایج نشان می‌دهند که تنش‌های پایه در سازه‌های فشاری گرادیـانی بـه شـدت تحـت تأثیر قرار گرفته و با تغییرات در پارامترهای سـازه ماننـد شـیب گرادیان، توزیع تنش در سازه نیز تغییر می‌کنـد. صـیدی [5] بـه تحلیل کمانشی سازه‌های مخروطی شکل ساندویچی بـا رویـه-های مواد تابعی هدفمند پرداختند که از یـک روش تحلیلـی بـا تئوری مرتبه بالاتر بهبودیافته شده بهره جسـتند. از قـدرت ایـن مقاله می‌توان به دقت بالای نتایج بـه دسـت آمـده و اسـتفاده از تئوری با دقت بالاتر بهبود یافته برای بررسی رفتـار پوسـته‌هـای ساندویچی با رویه‌های مـواد تـابعی هدفمنـد اشـاره نمـود و از طرفی عدم ارائه مقایسه نتایج با روش‌های موجود در این زمینـه می‌تواند به عنوان یک ضعف در این مقاله مطرح شود. نتایج این مقاله نشان می‌دهند که رفتار پوسته‌های ساندویچی با رویه‌هـای مواد تابعی هدفمند به شدت تحـت تـأثیر پارامترهـای مختلـف مانند ضخامت، نسبت شعاع کف و بالا، توزیع تـنش در پوسـته می‌باشد.

شینمن و گریف [6] به بررسی تحلیل دینامیکی پوسته‌هـای دو لایه از جنس کامپوزیت با شکل‌دهـی بـا اسـتفاده از تئـوری هـوگرن-لوکـاس-کرکهـایمر Hogben-Lucas-Krecker (HLK) پرداختند. این تئوری، به عنـوان یکـی از تئـوری‌هـای پیشـرفته محاسباتی، قابلیت استفاده در بررسی رفتار دینامیکی پوسته‌هـای کامپوزیتی را داراست. در این مقالـه، نویسـندگان بـا اسـتفاده از روش المان محدود و تئوری HLK، برای پوسته‌های دو لایـه از جنس کامپوزیت، نتایج تحلیلـی را ارائـه داده‌انـد کـه بـه دلیـل استفاده از روش تحلیلی دقیـق و تئـوری پیشـرفته، قابـل توجـه است و می‌تواند به عنوان یکی از منابع مفید برای بررسی رفتـار دینامیکی پوسته‌های کامپوزیتی با شـکل‌دهـی لایـه‌ای دو لایـه، استفاده شود. با این حال، ضعف این مقاله می‌تواند شـامل عـدم مطالعه تأثیر اثرات ترک‌ها و شکسـتگی‌هـا بـر رفتـار دینـامیکی پوسته باشد. همچنین، این مقاله تنها بـه پوسـته‌هـای دو لایـه از جنس کامپوزیت پرداختـه اسـت و بـه بررسـی پوسـته‌هـای بـا لایه‌های بیشتر و یا با جنس‌های متفاوت، پرداخته نشده اسـت و در آخر نتایج نشان می‌دهد که با افزایش زاویـه برشـی و شـعاع

پوسته، تنش‌های اصلی در پوسته افزایش می‌یابند و همچنین، با افزایش بار انتقالی، نقطه شکست پوسته به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

رامکومار و ثاکار [7] پوسته‌های چندلایه دارای انحنا را تحت اثر بار ضربه‌ای تحلیل کردند این کار در حوزه مواد مرکب و بهبود عملکرد سازه‌های مرکب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، از یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ دینامیکی پوسته استفاده شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، شکل و جنس لایه‌ها بر روی پاسخ دینامیکی بررسی شده است.

نوآوری این مقاله، استفاده از یک روش تحلیلی برای برآورد پاسخ دینامیکی پوسته‌های چندلایه دارای انحنا تحت ضربه با سرعت پایین است. علاوه بر این، بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی مانند ضخامت، شکل و جنس لایه‌ها بر روی پاسخ دینامیکی نیز از دیگر نوآوری‌های این مقاله است. در نهایت، نتایج به دست آمده از این تحقیق، نشان می‌دهد که برخی پارامترهای مانند ضخامت و جنس لایه‌ها می‌توانند تأثیر مهمی بر روی پاسخ دینامیکی پوسته‌های چندلایه دارای انحنا تحت ضربه با سرعت پایین داشته باشند. به علاوه، این پژوهش به نشان دادن تأثیر طرح لایه‌بندی بر روی پاسخ دینامیکی صفحات لامینه‌ای نیز می‌پردازد. ضعف این مطالعه، محدودیت در استفاده از روش تحلیلی مورد استفاده است که ممکن است برای برآورد پاسخ دینامیکی بعضی از سازه‌های مرکب به‌خصوص در شرایط مختلف، دقت کافی را نداشته باشد.

جانسون و هاموند [8] به بررسی رفتار رشد ترک داخلی پلی‌های تیتانیوم (Ti) در لایه‌های داخلی یک لامینه فایبر-فلز (Fiber Metal Laminate) با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی پرداختند. یکی از ویژگی‌های نوآورانه این پژوهش، انجام آزمایش‌های ترکی بر روی پلی‌های تیتانیوم داخلی لامینه فایبر-فلز بوده است که پیش‌تر در تحقیقات بسیار کمی مورد بررسی قرار گرفته بود. برای انجام این پژوهش، ابتدا نمونه‌های آزمایشی ساخته شده و سپس با استفاده از روش آزمایش ترکی، رفتار رشد ترک در پلی‌های تیتانیوم داخلی بررسی شده است. قدرت این پژوهش در بررسی دقیق و اصولی رفتار شکست و رشد ترک در فیبر فلز لامینه شده با استفاده از تحلیل ترموشعاعی و آزمون کرنش فیلم است. همچنین، استفاده از نرم‌افزار آنالیز المان محدود آباکوس باعث افزایش دقت و تحلیل شده است و از طرفی ضعف این مطالعه این است که آزمایش‌ها فقط بر روی نمونه‌های خاصی از فیبر فلز لامینه شده انجام شده و ممکن است به نتایجی که در سایر شرایط یا با استفاده از مواد مختلف به دست می‌آید، نیازمند بازبینی باشد و در آخر، نتایج نشان داد که ترک‌های شکست در پوسته فلزی باعث خرابی فیبر شده و به شکل خطی در آنها گسترش می‌یابد، افزایش سختی فلز داخلی موجب کاهش رشد ترک می‌شود و با افزایش ضخامت فلز داخلی، رفتار رشد ترک تغییر کمی می‌کند. همچنین نتایج آزمایش نشان داد که میزان رشد ترک در لایه فلزی بیشتر از لایه فیبری است.

کریستوفرو و همکاران [9,10] خرابی ناشی از ضربه به بافت کربن/اپوکسی در شکل سیلندری مورد بررسی قرار دادند. نوآوری این کار در استفاده از مدل‌سازی المان محدود برای تحلیل خرابی ضربه در این بافت بوده است. برای بررسی خرابی ضربه در بافت کربن/اپوکسی، از مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است و تأثیر پارامترهای مختلفی مانند سرعت ضربه، شکل سطح ضربه و زاویه ضربه بر خرابی مورد بررسی قرار گرفته است. قدرت این کار در استفاده از مدل‌سازی المان محدود در بررسی خرابی ضربه در بافت کربن/اپوکسی است که می‌تواند در طراحی سازه‌های سبک و مقاوم استفاده شود و از سوی دیگر، ضعف این کار می‌تواند مربوط به محدودیت در انجام آزمایش‌های عملی باشد. همچنین، مدل‌سازی المان محدود نیازمند دقت در مشخص کردن شرایط مرزی و پارامترهای ورودی است و در آخر، نتایج نشان می‌دهد که شکل سطح ضربه و زاویه ضربه بر خرابی تأثیر به‌سزایی دارند و خرابی بیشتر در محدوده سطح ضربه ایجاد می‌شود. همچنین، سرعت ضربه نیز تأثیر زیادی بر روی خرابی دارد. کومار و همکاران [11] به بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی مانند خصوصیات لمینت، ساختار توده‌ای و نحوه برخورد بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت‌های کامپوزیتی خمیده می‌پردازند. نوآوری این کار در بررسی تأثیر شکل خمیدگی و پارامترهای برخورد بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت‌های کامپوزیتی خمیده است. قدرت این پژوهش، استفاده از تحلیل عددی و آزمایش‌های عملی به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، به عنوان یک روش تحقیقی

کارآمد، می‌باشد و از طرف دیگر، ضعف این کار نیز می‌تواند عدم در نظر گرفتن برخی پارامترهای مهم مانند اثرات پیشرونده، تغییر شکل‌های پلاستیکی و تغییر شکل‌های شکستی در تحلیل عددی و آزمایش‌های عملی باشد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها و آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تغییر در خصوصیات لمینت، شکل خمیدگی و پارامترهای برخورد، تأثیر بسیاری بر روی پاسخ ضربه و خسارت در لمینت دارد.

هر و همکاران [12] از روش المان محدود برای بررسی رفتار سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای در برابر ضربه‌های کم سرعت استفاده کرده‌اند. نوآوری این پژوهش ارائه روش المان محدود برای شبیه‌سازی ضربه‌های کم سرعت بر روی سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای است که از المان‌های سه بعدی برای مدل‌سازی سازه‌های لایه‌ای استفاده شده است. در روش تحقیق، نویسندگان ابتدا رفتار آزمایشی سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای را بررسی کرده و سپس مدل المان محدود را برای شبیه‌سازی رفتار آنها توسعه داده‌اند و سپس با استفاده از این مدل المان محدود، بررسی شده است که نحوه قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی و پوسته‌ای در سازه، تأثیر بسیار زیادی بر روی رفتار سازه در برابر ضربه‌های کم سرعت دارد. از قوت‌های این پژوهش، استفاده از روش المان محدود برای تحلیل واکنش محیطی این نوع مواد است. همچنین، نتایج تجربی و مقایسه آن با نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مقاله، توانایی بالایی در توصیف واکنش محیطی مواد مرکب دارد و از سوی دیگر، ضعف احتمالی این مقاله ممکن است به دلیل نبود تجربه عملی محاسبات باشد که می‌تواند از دقت و اعتبار نتایج تحلیلی کاسته شود. همچنین، محدودیت‌هایی مانند تأثیرات دما، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی در نظر گرفته نشده است که می‌تواند به ناهمخوانی بین نتایج تحلیلی و تجربی منجر شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتار سازه‌های لایه‌ای کامپوزیتی و پوسته‌ای در برابر ضربه‌های کم سرعت به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و ترک‌ها و خراش‌های جدی در سطح سازه ایجاد می‌شود. همچنین، ملاحظه شد که روش قرارگیری لایه‌های کامپوزیتی و پوسته‌ای در سازه، تأثیر زیادی بر روی رفتار سازه در برابر ضربه‌های کم سرعت دارد.

ساختارهای ساندویچی FML/Core/FML عبارتند از دو رویه FML (Fiber Multi-layer) که در بالا و پایین هسته واقع شده‌اند. رویه‌های FML می‌توانند از مواد فلزی مانند آلومینیم، فولاد، مس و تیتانیوم به همراه الیاف از نوع شیشه، کولار و کربن ساخته شوند. هسته می‌تواند از جنس فوم (از نوع متخلخل و یا متراکم) و یا ماده FGM باشد [13]. هاچینسون و هی [14] به بررسی رفتار بالقوه برای پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی پرداختند. برای این منظور از روش المان محدود استفاده شده است تا رفتار مکانیکی پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی را برای بارگذاری‌های محوری و فشاری بررسی کنند. قدرت این پژوهش این است که به دلیل اینکه در پژوهش‌های قبلی بررسی نشده بود، می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شود اما ضعف این مطالعه این است که تنها رفتار پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم فلزی بررسی شده است و تأثیر پارامترهای دیگری مانند جنس پوسته و هسته بر رفتار پوسته‌های فوم فلزی در برابر بارگذاری ناشی از فشار مؤثر بررسی نشده است. به علاوه، رفتار پوسته‌های فوم فلزی با هسته فوم پلیمری مورد مطالعه قرار نگرفته است و نتایج نشان می‌دهد که پوسته فوم فلزی با هسته فوم فلزی در مقایسه با پوسته فوم پلیمری با هسته فوم فلزی، عملکرد بسیار بهتری در برابر فشار مؤثر دارد. همچنین، این مطالعه نشان داد که با افزایش ضخامت پوسته، باربری مؤثر پوسته فوم فلزی با هسته فوم فلزی افزایش می‌یابد. گارگ و همکاران [15] به طراحی و تحلیل سازه‌های مرکب، به‌ویژه پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی، متمرکز شدند. در این پژوهش، روش‌های بسته بالاتر برای حل مسئله ارتعاش آزاد پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی ارائه شده است. این روش‌ها بر اساس تئوری لایه‌ای پوسته و با در نظر گرفتن تأثیر تغییرات ضخامت و جهت المان‌ها به‌کار گرفته شده‌اند. استفاده از روش‌های بسته بالاتر برای حل مسئله‌های پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی، مزیت‌هایی مانند دقت بیشتر و سرعت حل بیشتر را به‌دنبال دارد. همچنین، در این مقاله به‌عنوان یک نوآوری، تأثیر ضخامت و جهت المان‌ها بر رفتار ارتعاشی پوسته‌های کامپوزیتی و ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، ضعف این پژوهش ممکن است شامل محدودیت در نوع سازه‌های مورد مطالعه و انجام آزمایش برروی آنها باشد.

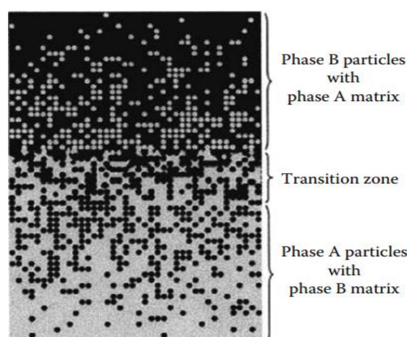
همچنین، محدودیت‌هایی مانند عدم در نظر گرفتن تـأثیر شـکل هندسی و تغییرات دما بر رفتار سازه‌ها نیـز مـی‌توانـد بـه‌عنـوان ضعف مطرح شود.

رحمـانی و همکـاران [16] بـه بررسـی و پـژوهش پاسـخ لرزشی یک پوسته استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر می‌پردازد. در این پژوهش، از روش المان محدود برای مـدل‌سـازی پوسـته و هسته استفاده شده است و نتایج به‌دست‌آمـده بـا نتـایج تجربـی مقایسه شده‌اند. نوآوری ایـن پـژوهش، اسـتفاده از یـک هسـته انعطاف‌پذیر در ساختار پوسته‌ای استوانه‌ای است. بـدین منظـور ابتدا مدل المان محدود پوسته‌ای استوانه‌ای با هسته انعطاف‌پذیر ساخته شده و پس از آن پاسخ لرزشی سازه با اسـتفاده از روش المان محدود به‌دست آمده است. در انتها، نتایج به دست آمده با نتایج تجربی مقایسه و تحلیل شده‌اند. قـدرت ایـن پـژوهش در بررسی تأثیر هسته انعطاف‌پذیر در پوسته‌هـای اسـتوانه‌ای اسـت که می‌تواند بهبود خواص لرزشـی و اسـتحکام سـازه را فـراهم کنـد، امـا ضـعف آن مربـوط بـه محـدودیت در بررسـی تـأثیر مختصات هسته بر خواص سازه است و در آخر نتایج پـژوهش نشان می‌دهد که استفاده از هسته انعطـاف‌پـذیر در پوسـته‌هـای استوانه‌ای می‌تواند خواص لرزشـی و اسـتحکام سـازه را بهبـود بخشد.

مواد FGM در یـک سـطح خـود دارای سـرامیک خـالص می‌باشند که نقطه ضعف سرامیک‌ها در مقایسه با دیگر مـواد بـه ویژه فلزات، چقرمگی پایین آنها است که در عمل ایـن مـواد را در برابر ترک بسیار حساس کرده است. بنابراین نیاز شدیدی بـه افزایش چقرمگی سرامیک‌ها احسـاس مـی‌شـود. لـذا گنجانـدن رویه‌ای مقاوم می‌تواند عملکرد بهتری را منجر شـود. از طرفـی سطح دیگر مواد FGM فلز خالص بـوده کـه بـه منظـور بهبـود خواص آن می‌توان از رویه‌ای مقـاوم بهـره جسـت تـا ظرفیـت گرمایی، مقاومت به خوردگی و سایش سطح فلـزی را افـزایش دهد. این رویه‌های مقاوم بـه صـورت مـواد مرکـب چنـد لایـه می‌باشند، متشکل از چند لایه بوده که در کنار هم قرار گرفته‌اند ولی در عین حال قابل حل در یکدیگر نیستند این مواد از یـک رزین پلیمری (پلاستیک تقویت شده با مولکول‌های درشت) به عنوان زمینه با رشته‌ها و الیـافی بـه عنـوان عامـل تقویـت‌کننـده تشکیل می‌شوند. از این رو، در این پژوهش در دو طرف هسـته FGM مواد مرکـب چندلایـه قـرار داده شـد و رفتـار دینـامیکی غیرخطی هندسی این نوع سازه‌ها مورد تحلیل قرار گرفتـه مـی-شود. همچنین، پوسته‌ها به‌دلیل سطح گسـترده و ضـخامت کـم اغلب در برابر بارهای ضربه‌ای دچار تغییرمکان زیادی می‌شوند. براساس جستجوهای انجام شده، تاکنون کمتر بـه بحـث ضـربه روی پوسته‌های استوانه‌ای MLC با هسته FGM پرداختـه شـده است. لذا از جمله نوآوری‌ها و ویژگی‌های این پژوهش، بررسی عملکرد مقایسه‌ای پارامترهای اثرگذار بر پاسخ دینامیکی پوسـته استوانه‌ای با ساختار MLC-FGM-MLC تحت بار ضربه عنـوان نمود که شامل بررسی تأثیرگذاری شاخص توان حجمـی هسـته FGM، نوع لایه‌هـا (CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic و (GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic، زوایـای قرارگیـری لایه‌ها و تعداد لایه‌های مـواد مرکـب چندلایـه، بـر روی پاسـخ پوسته می‌باشد. برای این کار، با استفاده از روش المان محـدود، پوسته به عنوان یک مجموعه از المان‌های پوسـته‌ای کوچـک‌تـر در نرم‌افزار آبـاکوس مـدل‌سـازی مـی‌شـود و رفتـار دینـامیکی غیرخطی هندسی آن با استفاده از معادلات حاکم بر المـان‌هـای تغییر شکل یافته شده در هر گام زمانی مورد بررسی قـرار مـی-گیرد.

مبانی و مفاهیم پایه

مواد هدفمند گونه‌ای از مواد مرکب هستند که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشـگران را بـه خـود جلـب کـرده اسـت. خواص مکانیکی این مواد به‌طور پیوسته از یک سطح بـه سـطح دیگر تغییر می‌کند و این تغییرات به وسیله تغییر تدریجی نسبت حجمی مواد تشکیل دهنده آنها ایجاد می‌شود. قابل توجه اسـت که به علت تغییرات پیوسته خواص مکـانیکی، مشـکلات عـدم پیوسـتگی کـه در سـاختارهای مرکـب موجـود اسـت در مـواد هدفمند به وجود نمی‌آیـد. در شـکل (۱) نمـای شـماتیک یـک ساختار هدفمند متشکل از دو ماده A و B نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایش شماتیک ماده FGM تشکیل‌شده از دو فاز A و B [17]

در این پژوهش پوسته هدفمند ساخته‌شده از فازهای سرامیک و فلز، دارای تغییری تدریجی و پیوسته از خواص مواد در راستای ضخامت خود باشد. با استفاده از قانون اختلاط، خواص مواد هم‌چون ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در سراسر ضخامت متغیر است. این تغییر خواص به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$p(z) = p_c V_c(z) + p_m V_m(z) \qquad (۱)$$

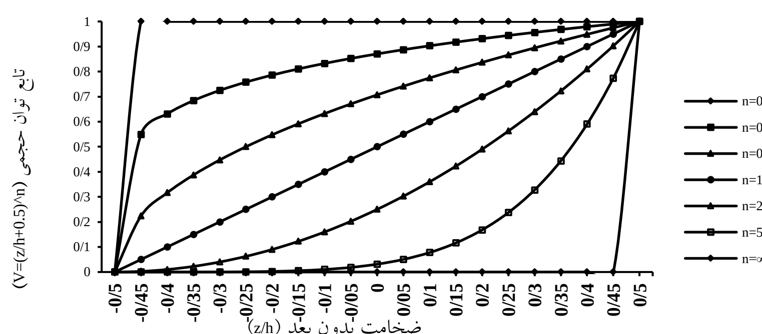
که در آن، p_c و p_m به‌ترتیب بیانگر خواص مواد فازهای سرامیکی و فلزی FGM می‌باشد و $V_c(z)$ و $V_m(z)$ به ترتیب تابع حجمی سرامیک و فلز می‌باشند که به صورت زیر بیان می‌گردد [18-19].

$$V_c(z) + V_m(z) = 1 \qquad (۲)$$

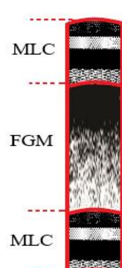
$$V_c = \left(\frac{2z + h}{2h}\right)^n \qquad (۳)$$

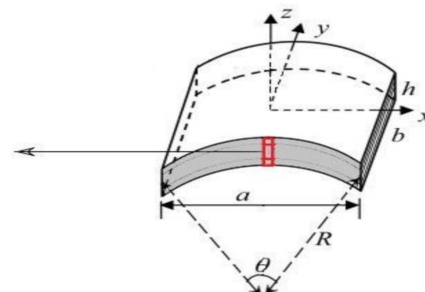
در این رابطه n شاخص توان حجمی، h ضخامت پوسته موردنظر می‌باشد. در پژوهش حاضر، در فرآیند تحلیل هفت مقدار مختلف برای شاخص توان حجمی ($n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) در نظر گرفته شده است که دو مقدار صفر و بی‌نهایت به ترتیب به صفحه کاملا سرامیکی و صفحه کاملا فلزی مربوط می‌شود. تغییرات تابع توان حجمی $(z/h+0.5)^n$، در راستای ضخامت صفحه (h) برای مقدارهای مختلف n در شکل (۲) نشان داده شده است.

سیستم مختصات کارتزین (x, y, z) پوسته استوانه‌ای MLC با هسته FGM در سطح میانی پوسته قرار می‌گیرد. محور z در راستای ضخامت پوسته و رو به سمت بالا مثبت در نظر گرفته می‌شود و محور y عمود بر محور x در سطح میانی پوسته قرار می‌گیرد (شکل ۳). تغییر مکان پوسته در راستای ضخامت پوسته با حرف w نشان داده می‌شود.



شکل ۲ تغییرات تابع شاخص توان حجمی $(z/h+0.5)^n$





ب الف

شکل ۳ الف) هندسه و مختصات کارتزین پوسته استوانه‌ای توخالی ب) شماتیک قرارگیری لایه‌های MLC و FGM در راستای ضخامت پوسته

راستی‌آزمایی

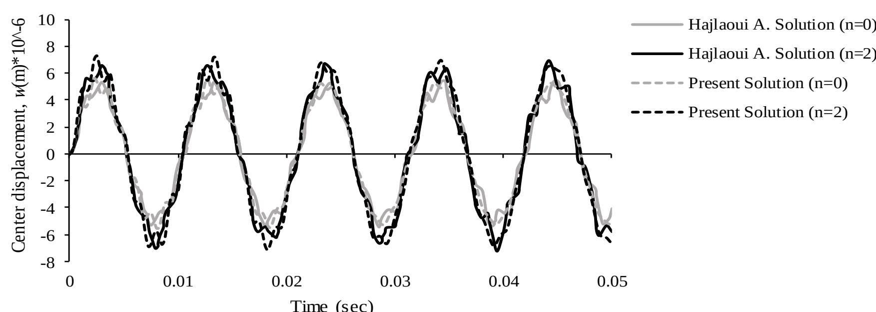
به‌منظور راستی‌آزمایی نحوه مدل‌سازی پوسته استوانه‌ای FGM و پوسته MLC تحت بار ضربه در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، از نتایج عددی پژوهش انجام‌شده توسط حاج‌لویی (Hajlaoui) و همکاران [19] برای صحت‌سنجی پوسته‌های استوانه‌ای FGM و از پژوهش هوفت و همکاران [20] برای صحت‌سنجی پوسته‌های چندلایه تحت ضربه استفاده شده است.

حاج‌لویی و همکاران به بررسی عددی پاسخ دینامیکی غیرخطی پوسته‌های استوانه‌ای توخالی FGM که سطح کل پوسته تحت فشار یکنواخت $q(t)=1500sin(600t)$ می‌باشد، پرداختند. این پوسته با ابعاد $R/h=500$، $L/R=80$ (که R شعاع، h ضخامت و L طول پوسته می‌باشد) و دارای تکیه‌گاه ساده با دو شاخص توان حجمی ($n=0, 2$) در ۱۰ لایه مدل‌سازی گردید. خواص مکانیکی مواد در جدول (۱) آورده شده است. شرایط مرزی در چهار لبه پوسته به صورت مفصلی می‌باشد و از اثر استهلاک و میرایی صرف‌نظر شده است. تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی با گام زمانی $\Delta t = 0.01T$ انجام شده است که T دروه تناوب طبیعی سازه می‌باشد. در این پژوهش، نتایج عددی مرجع [19] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس راستی‌آزمایی شد که المان پوسته چهار گرهی SR4 با ۲۴ درجه آزادی برای تحلیل در نرم‌افزار آباکوس انتخاب شده است. در شکل (۴) تاریخچه زمانی تغییرمکان مرکز پوسته توخالی و در جدول (۲) بیشینه تغییرمکان مرکز پوسته توخالی برای دو مقدار توان حجمی نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، نتایج مدل‌سازی دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقدارهای گزارش‌شده حاصل از مرجع [19] است.

در پژوهشی دیگر هوفت و همکاران [20] یک پوسته تک-لایه دو انحنایی از مواد مرکب با مشخصات $h = 2.5\,\text{mm}$ (ضخامت)، $R_1 = R_2 = 396\,\text{mm}$ (شعاع انحنا)، $\psi_0 = \theta_0 = 40^\circ$ (زاویه داخلی) را تحت اثر بار ضربه‌ای به معادله $P(t) = P_0 e^{-t/\tau}$ که در آن $P_0 = 0.9\,\text{MPa}$ و $\tau = 1\,\text{ms}$ می‌باشد، تحلیل کرده‌اند. در شکل (۵) هندسه این پوسته نشان داده شده است. شرایط مرزی در این مسئله به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است و از اثر میرایی صرف نظر شده است. خصوصیات ماده در جدول (۳) نشان داده شده است. در شکل (۶) و جدول (۴) نتایج حاصل از حل عددی مرجع [20] با نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر توسط نرم‌افزار آباکوس نشان داده شده است. برای مدل‌سازی مسئله مورد نظر در نرم‌افزار آباکوس از المان پوسته چهار گرهی SR4 با ۲۴ درجه آزادی استفاده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود نتایج نرم‌افزار دارای دقت قابل قبولی در مقایسه با مقادیر مرجع [20] می‌باشد.

جدول ۱ خواص مکانیکی پوسته FGM [19]

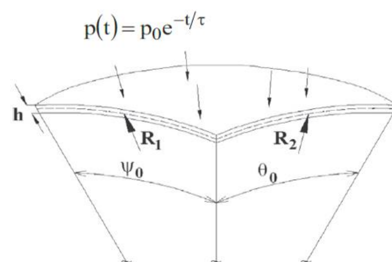
نوع مواد	ضریب کشسانی (GPa)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون
تیتانیوم (فلز)	۱۰۵/۶۹۶۰	۴۴۲۹	۰/۲۹۸۱
زیرکونیا (سرامیک)	۱۵۴/۳۲۱۱	۵۷۰۰	۰/۲۹۸۰



شکل ۴ مقایسه بین تاریخچه زمانی تغییر مکان مرکز پوسته استوانه‌ای توخالی FGM حاصل از نرم‌افزار آباکوس و مرجع [19]

جدول ۲ مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس و مرجع [19]

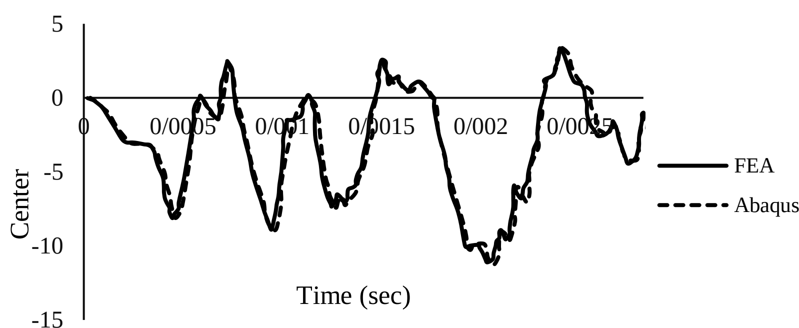
	شاخص توان حجمی	نرم‌افزار آباکوس	مرجع [19]	درصد خطا (٪)
بیشینه تغییرمکان مرکز پوسته (mm)	۰	−۵/۵۱۸	−۵/۴۵۸	۱/۰۹
	۲	−۷/۱۹۳	−۷/۲۰۴	۰/۱۵



شکل ۵ هندسه پوسته دو انحنایی [20]

جدول ۳ خواص مکانیکی ماده مرکب [20]

خواص مواد	0/90 Woven Roving E-Glass/Vinyl Ester
Density (kg/m^3)	1391
E_x (GPa)	17
E_y (GPa)	17
E_z (GPa)	7.48
G_{xy} (GPa)	4
G_{yz} (GPa)	1.73
G_{xz} (GPa)	1.73
υ_{xy}	0.13
υ_{yz}	0.28
υ_{xz}	0.28



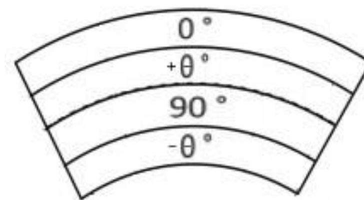
شکل ۶ مقایسه تغییرشکل مرکز پوسته حاصل از نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر) و روش FEA مرجع [20]

جدول ۴ نتایج حاصل از از نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر) و روش FEA مرجع [20]

	نرم‌افزار آباکوس (پژوهش حاضر)	روش FEA مرجع [20]	درصد خطا (٪)
بیشینه تغییرشکل مرکز پوسته (mm)	۱۱/۵۲	۱۱/۳۶	۱/۴

تحلیل و بررسی

رویه‌های پوسته مورد بررسی (شکل ۳) از مواد مرکب ساخته شده‌اند که از چینش تعدادی تک‌لایه روی یکدیگر حاصل می‌شوند. زاویه قرارگیری و تعداد لایه‌های MLC، در تعیین خصوصیات پوسته اهمیت دارد. لذا با توجه به تعداد لایه‌ها برای هر چهار لایه که بر روی هم قرار می‌گیرد لایه‌چینی $\left[0^{\circ}/+\theta^{\circ}/90^{\circ}/-\theta^{\circ}\right]$ انتخاب شده که در صورت افزایش تعداد لایه‌ها همین لایه‌چینی تکرار گردیده است (شکل ۷). از طرفی هسته پوسته مورد نظر از FGM ساخته شده است که از عوامل مهم اثرگذار بر روی این مواد، شاخص توان حجمی می‌باشد. بنابراین در ادامه اثر شاخص توان حجمی FGM، زوایای قرارگیری لایه‌ها و تعداد لایه‌های MLC مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.



شکل۷ زاویه‌های قرارگیری تک‌لایه‌ها در رویه MLC

مدل‌سازی عددی. در پژوهش حاضر، تحلیل عددی به روش اجزای محدود برای پوسته‌های استوانه‌ای ساخته‌شده از مواد مرکب چندلایه با هسته مواد هدفمند تحت ضربه انجام شده است که در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از روش صریح مدل‌سازی و تحلیل صورت پذیرفته شده است. پوسته دارای ابعاد $a=b=1$ (شکل ۲) و شرایط تکیه‌گاهی در چهار لبه پوسته (شکل ۸) به صورت مفصلی می‌باشد. مابقی مشخصات هندسی پوسته بنابر مطالعه‌های پارامتری مشخص شده است. ضربه فرندر (Frender) به معادله (۴)، به سطح خارجی پوسته اعمال می‌شود. با بهره‌گیری از گزینه NIgeom در نرم‌افزار آباکوس برای اثر تغییرشکل‌های بزرگ، پاسخ دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و گام زمانی $\Delta t=0.01T$ انتخاب شده است که T درره تناوب طبیعی سازه می‌باشد. انتخاب گام زمانی مناسب از طریق سعی و خطا انجام شده است بدین صورت که با کوچک‌تر کردن اندازه گام زمانی تلاش و زمان محاسبات به مقدار زیادی افزایش می‌یابد در صورتی که پاسخ به مقدار ناچیزی تغییر می‌کند. از اثر استهلاک و میرایی صرف‌نظر شده است. به منظور شبکه‌بندی پوسته‌ها از مرجع [22] بهره جسته شد و جزء پوسته‌ای چهارگرهی (S4R) به ابعاد ۱۰×۱۰ میلی‌متر برای مدل‌سازی پوسته‌ها انتخاب شد. به منظور مدل‌سازی هسته FGM پوسته از مرجع [22] کمک گرفته شد که به صورت ۱۴ لایه همگن با ضخامت ۶ میلی متر انجام گردید که به صورت لایه‌های پیوسته به هم در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. دو ماده مرکب GFRP و CFRP که دارای کاربرد فراوانی می‌باشد، به عنوان رویه‌های MLC پوسته استوانه‌ای مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند. سعی بر آن بوده تا رویه‌های MLC به کار رفته هم‌وزن با هسته FGM پوسته باشند لذا با توجه به ثابت بودن طول و دهانه پوسته استوانه‌ای، تنها ضخامت رویه‌های MLC متغیر بوده و براساس نوع آن (GFRP و CFRP) و شاخص توان حجمی هسته FGM مشخص می‌گردد. همان طور که بیان شد پوسته استوانه‌ای مورد بررسی متشکل از مواد مرکب و مواد هدفمند می‌باشد که جنس به کار رفته شده در رویه‌ها و هسته پوسته به صورت، رویه داخلی/ هسته/ رویه خارجی، نمایش داده می‌شود. لذا در بررسی پارامترهای اثرگذار چهار حالت مختلف CFC مخفف CFRP/FGM/CFRP، CFG مخفف CFRP/FGM/GFRP، GFC مخفف GFRP/FGM/CFRP و GFG مخفف GFRP/FGM/GFRP در نظر گرفته شد.

$$P(x,y,t)=P_0P_t(t)P_s(x,y) \quad (۴)$$

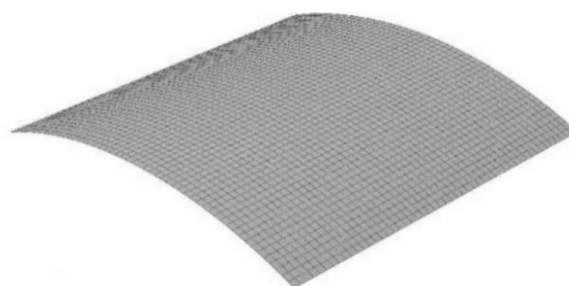
$$P_0=100\,\text{kPa} \quad (۵)$$

$$P_s(x,y)=1.0 \quad (۶)$$

$$Friedlander\ \ Function: \begin{cases} P_t(t) = (1 - t/t_p)e^{-\alpha t/t_p}, & t \le t_p \\ \quad =0, & t > t_p \end{cases} \qquad (۷)$$

جدول ۵ خواص مکانیکی مواد FGM [24]

خواص مواد	ضریب کشسانی (GPa)	چگالی (kg/m^3)	نسبت پواسون
آلومینیوم (فلز)	۶۷	۲۷۰۲	۰/۳۳
سیلیکون‌کاربید (سرامیک)	۳۰۲	۳۱۰۰	۰/۱۷



شکل ۸ شبکه‌بندی پوسته استوانه‌ای در پژوهش حاضر

جدول ۶ خواص مکانیکی مواد مرکب [25]

خواص مواد	CFRP	GFRP
Density (kg/m^3)	1572	2301
E_x (GPa)	121	46.3
E_y (GPa)	14	11.6
E_z (GPa)	14	11.6
G_{xy} (GPa)	5.05	4.28
G_{yz} (GPa)	5.02	4.18
G_{xz} (GPa)	5.05	4.28
υ_{xy}	0.17	0.25
υ_{yz}	0.40	0.39
υ_{xz}	0.020	0.062

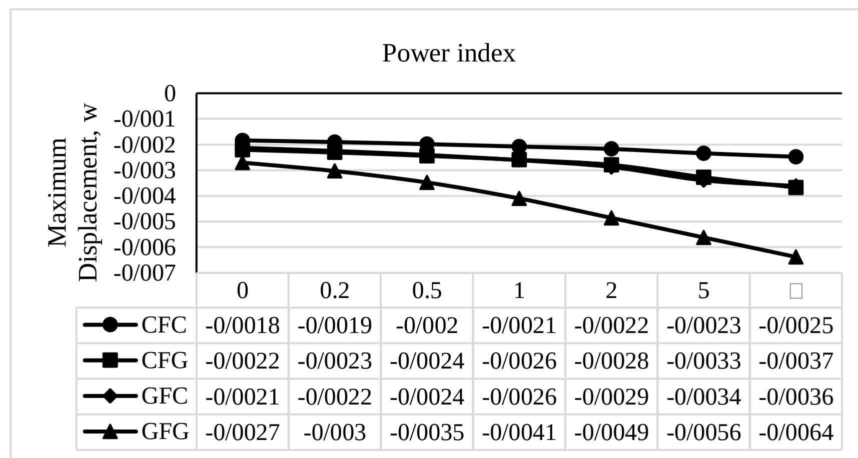
که P_0 ماکزیمم فشار در مدت زمان بارگذاری می‌باشد، $P_t(t)$ توزیع فشار در محدوده زمان و P_s توزیع فشار بر روی سطح پوسته می‌باشد. α پارامتر شکل موج، t مدت زمان گذارنده شده و t_p زمان بارگذاری می‌باشد که در این پژوهش $t_p = 20ms$, $\alpha = 2$ درنظر گرفته شده است [23].

مشخصات مصالح مصرفی. نوع اختلاط مواد FGM به‌صورت فلز - سرامیک (آلومینیوم - سیلیکون‌کاربید) انتخاب شده است. خواص مکانیکی این مواد نظیر ضریب کشسانی، چگالی و نسبت پواسون در جدول (۵) آورده شده است [24]. رویه‌های بالا و پایین پوسته‌ها که از مواد مرکب GFRP و CFRP MLC ساخته شده است و مشخصات مکانیکی آنها در جدول (۶) نمایش داده شده است [25]. هندسه پوسته مورد نظر در شکل (۳) نشان داده شده است و شبکه‌بندی پوسته نیز در شکل (۸) نشان داده شده است.

پارامترهای مورد بررسی

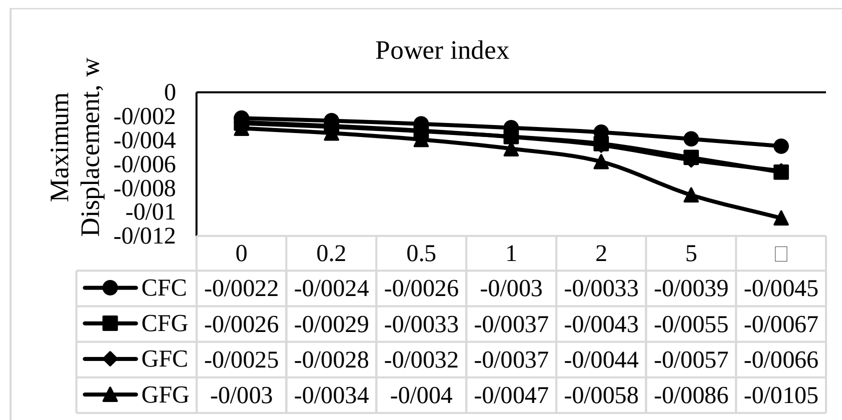
بررسی اثر شاخص توان حجمی (n). به‌منظور بررسی اثر شاخص توان حجمی ماده FGM در هسته پوسته هفت توان حجمی ($n = 0.0, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, \infty$) با انحنای ۰/۲۵ (شعاع ۴ متر) در معرض بار ضربه مدل‌سازی شدند که رویه‌های مرکب چندلایه در دو طرف هسته FGM به صورت

چهارلایه و با زوایای [0°/ 45°/ 90°/ -45°] لایه‌چینی شده‌اند. در شکل (۹) ماکزیمم جابه‌جایی پوسته به ازای شاخص‌های توان حجمی مختلف هسته FGM پوسته برای چهار حالت GFG, GFC, CFG, CFC در تحلیل دینامیکی خطی (الف-۹) و غیرخطی هندسی (ب-۹) مورد بررسی قرار گرفته شد، همان‌طور که مشاهده می‌شود ماکزیمم جابه‌جایی پوسته در حالت خطی کمتر از حالت غیرخطی هندسی می‌باشد و با افزایش شاخص توان حجمی مقدار بیشینه تغییرمکان افزایش یافته است، به‌طوری‌که بیشینه تغییرمکان در پوسته تمام فلزی ($n=\infty$) و کمینه تغییرمکان در پوسته تمام سرامیکی ($n=0$) اتفاق افتاده است. همچنین ملاحظه می‌شود که شیب تغییرات ماکزیمم جابه‌جایی در حالت‌های GFG و CFC به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار می‌باشد که در شاخص‌های توان حجمی بزرگ از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد. تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هریک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۱۳-۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش شاخص توان حجمی، دامنه نوسانات و تعداد نقاط اوج تغییر مکان به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته است که در حالت GFG دارای بیشترین دامنه نوسان و کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای کمترین دامنه نوسان و بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد و حالت‌های CFG و GFC بین دو حالت CFC و GFG می‌باشد.



	0	0.2	0.5	1	2	5	□
CFC	-0/0018	-0/0019	-0/002	-0/0021	-0/0022	-0/0023	-0/0025
CFG	-0/0022	-0/0023	-0/0024	-0/0026	-0/0028	-0/0033	-0/0037
GFC	-0/0021	-0/0022	-0/0024	-0/0026	-0/0029	-0/0034	-0/0036
GFG	-0/0027	-0/003	-0/0035	-0/0041	-0/0049	-0/0056	-0/0064

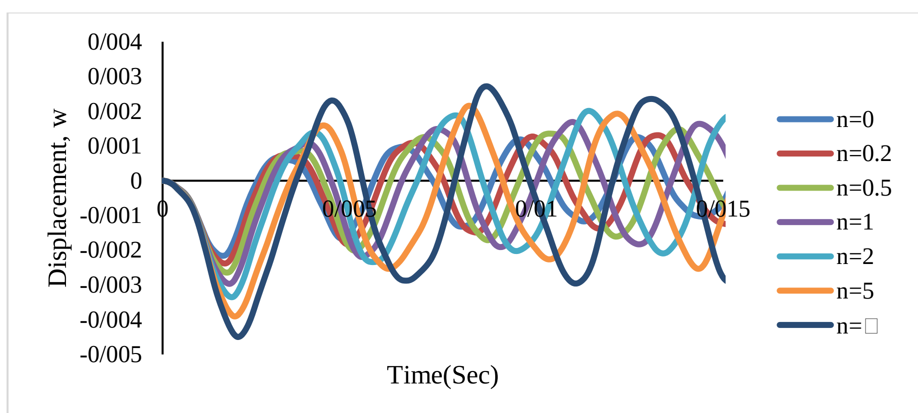
(الف)



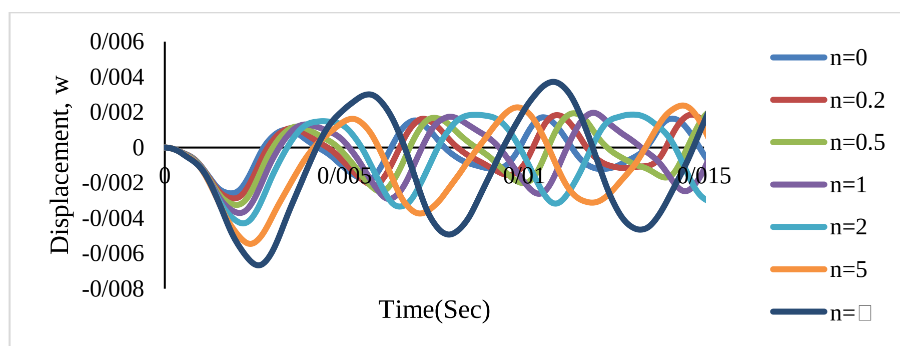
	0	0.2	0.5	1	2	5	□
CFC	-0/0022	-0/0024	-0/0026	-0/003	-0/0033	-0/0039	-0/0045
CFG	-0/0026	-0/0029	-0/0033	-0/0037	-0/0043	-0/0055	-0/0067
GFC	-0/0025	-0/0028	-0/0032	-0/0037	-0/0044	-0/0057	-0/0066
GFG	-0/003	-0/0034	-0/004	-0/0047	-0/0058	-0/0086	-0/0105

(ب)

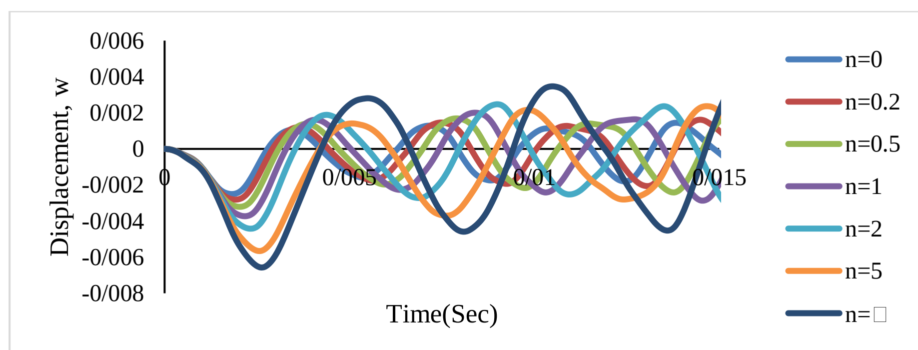
شکل ۹ بیشینه تغییرمکان پوسته بر حسب شاخص توان حجمی هسته FGM پوسته در تحلیل دینامیکی خطی (الف) و در تحلیل دینامیکی غیرخطی هندسی (ب)



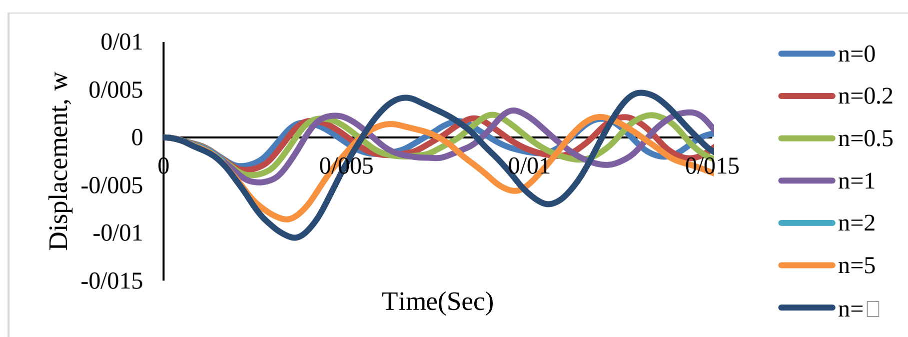
شکل ۱۰ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت CFC



شکل ۱۱ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت CFG

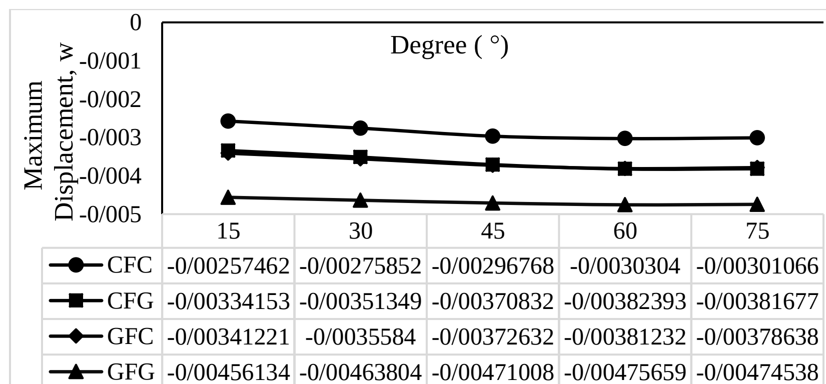


شکل ۱۲ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت GFC



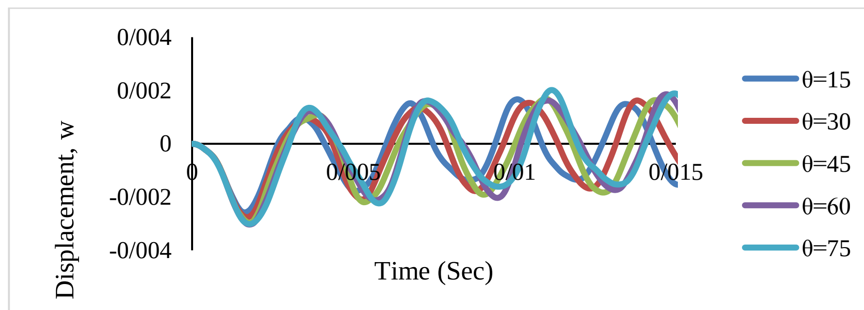
شکل ۱۳ تاریخچه‌ی زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته با شاخص‌های توان حجمی مختلف برای هسته FGM پوسته در حالت GFG

نحوه قرارگیری لایه‌ها در رویه‌های مرکب. به‌منظور بررسی نحوه قرارگیری تک‌لایه‌ها در رویه‌های مرکب چندلایه، پنج زاویه ($\theta = 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}$) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت (شکل ۳). پوسته‌هایی با انحنای ۰/۲۵ (شعاع ۴ متر)، ضخامت ۱۲ میلی‌متر و با هسته FGM دارای شاخص توان حجمی $n = 1$ در معرض بار ضربه مدل‌سازی شدند. در شکل (۱۴) ماکزیمم جابه‌جایی‌های غیرخطی هندسی پوسته به ازای زاویای مختلف در حالت‌های GFG, GFC, CFG, CFC به دست آورده شد که مشاهده می‌شود در حالتی که $\theta = 15^{\circ}$ انتخاب گردد کمترین ماکزیمم جابه‌جایی در پوسته رخ می‌دهد و از طرفی انتخاب $\theta = 60^{\circ}$ موجب بیشترین ماکزیمم جابه‌جایی را در پوسته می‌شود. از طرفی با افزایش زاویه قرارگیری الیاف نسبت به راستای بدون انحنای پوسته، شیب تغییرات ماکزیمم جابه‌جایی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد قرارگیری الیاف در راستای بدون انحنای پوسته تأثیر بیشتری بر روی پاسخ می‌گذارد. تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۱۸–۱۵) نشان داده شده است. با افزایش θ، تعداد نقاط اوج تغییر مکان مرکز پوسته کاهش یافته است و همچنین در حالت GFG دارای کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد.

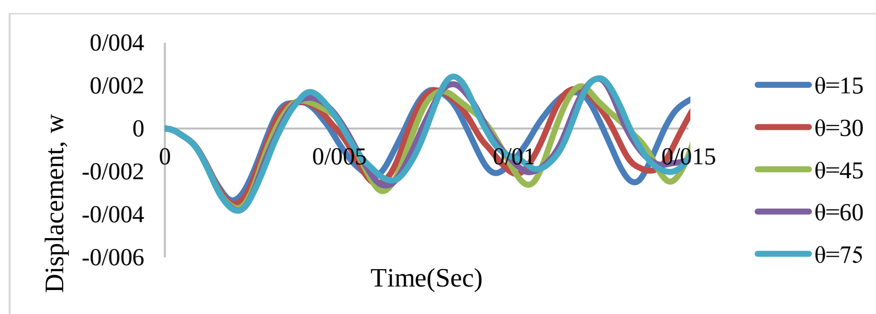


	15	30	45	60	75
CFC	-0/00257462	-0/00275852	-0/00296768	-0/0030304	-0/00301066
CFG	-0/00334153	-0/00351349	-0/00370832	-0/00382393	-0/00381677
GFC	-0/00341221	-0/0035584	-0/00372632	-0/00381232	-0/00378638
GFG	-0/00456134	-0/00463804	-0/00471008	-0/00475659	-0/00474538

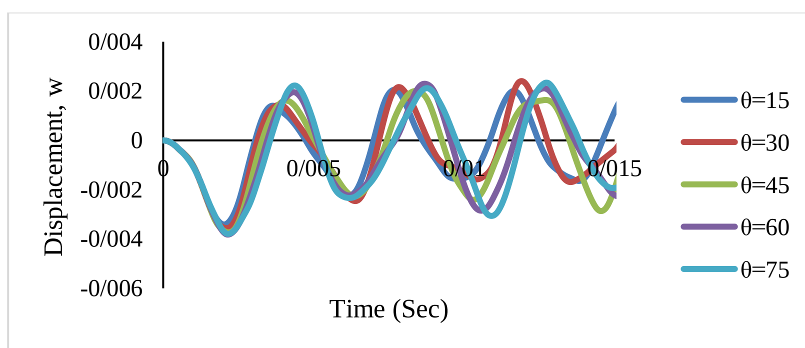
شکل ۱۴ بیشینه تغییرمکان غیرخطی هندسی پوسته بر حسب زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها



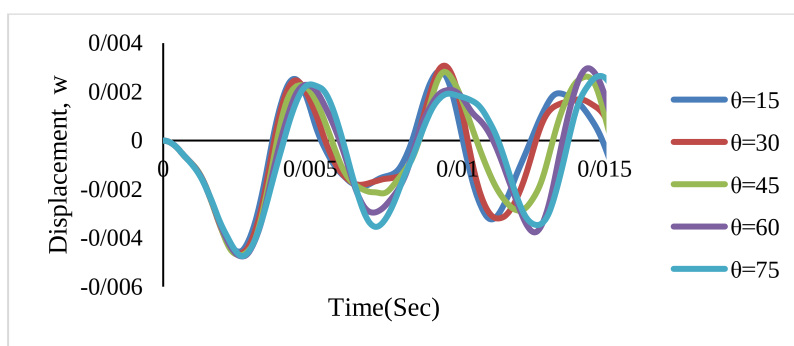
شکل ۱۵ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت CFC



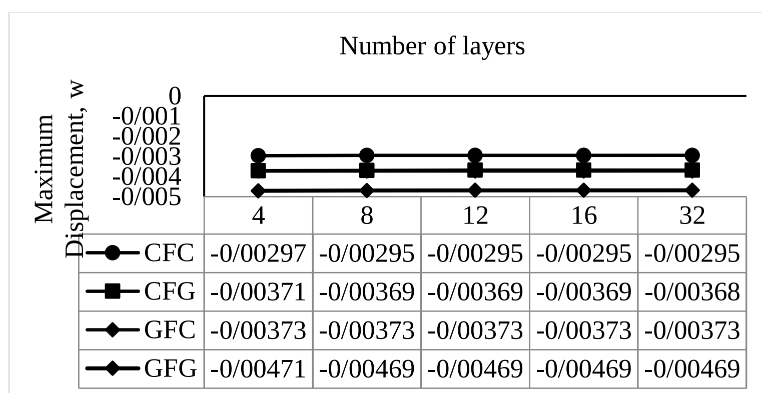
شکل ۱۶ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت CFG



شکل ۱۷ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت GFC



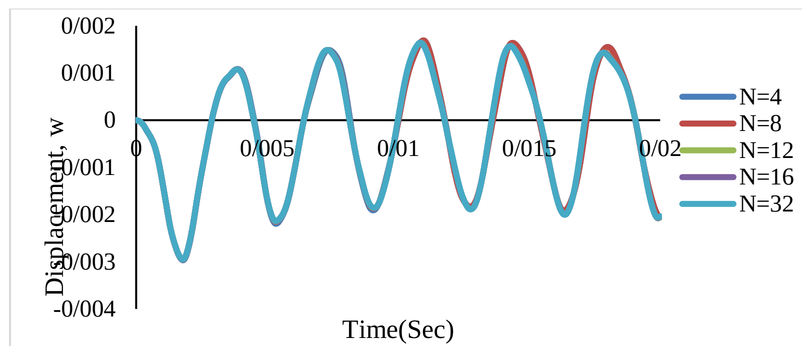
شکل ۱۸ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای زوایای مختلف قرارگیری الیاف در لایه‌ها در حالت GFG



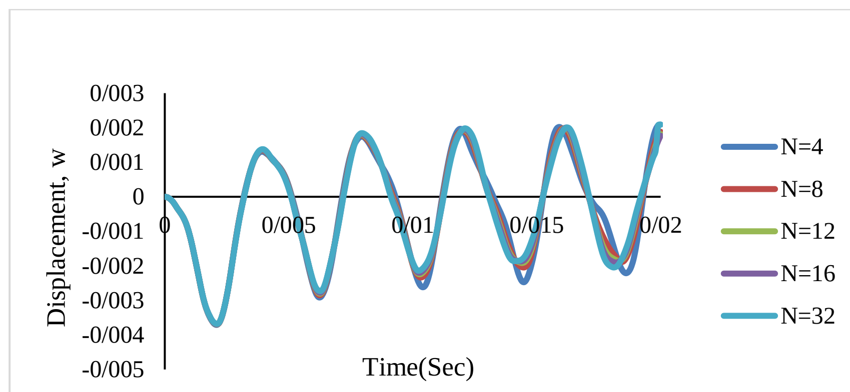
	4	8	12	16	32
CFC	-0/00297	-0/00295	-0/00295	-0/00295	-0/00295
CFG	-0/00371	-0/00369	-0/00369	-0/00369	-0/00368
GFC	-0/00373	-0/00373	-0/00373	-0/00373	-0/00373
GFG	-0/00471	-0/00469	-0/00469	-0/00469	-0/00469

شکل ۱۹ بیشینه تغییرمکان غیرخطی هندسی پوسته بر حسب تعداد لایه‌های مختلف

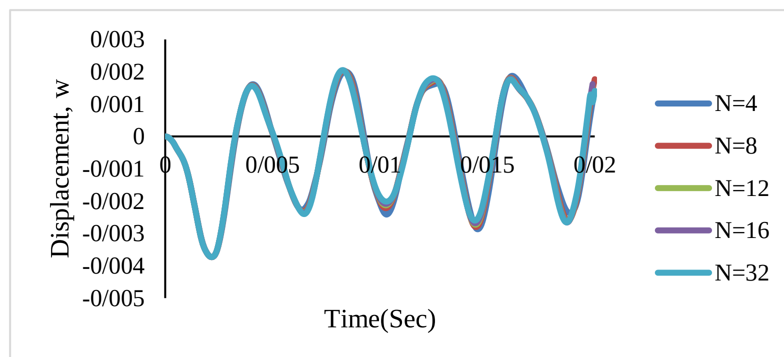
بررسی اثر تعداد لایه‌های رویه‌های مرکب. به‌منظور بررسی اثر تعداد لایه‌های رویه‌های مرکب در پوسته، مدل‌های دارای ۴، ۸، ۱۲، ۱۶ و ۳۲ لایه در معرض بار ضربه قرار گرفته شدند. در این بررسی انحنای ۰/۲۵ (شعاع ۴ متر) و لایه‌چینی [-45°/ 90°/ 45°/ 0°] برای هر ۴ لایه در رویه‌های مرکب پوسته می‌باشد و نیز برای هسته FGM پوسته، شاخص توان حجمی $n=1$ در نظر گرفته شد. در شکل (۱۹) ماکزیمم جابه‌جایی غیرخطی هندسی پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف برای چهار حالت GFG, GFC, CFG, CFC مورد بررسی قرار گرفته شد. همان طور که مشاهده می‌شود افزایش تعداد لایه در رویه‌های مرکب پوسته بیشینه تغییرمکان با شیب ملایمی کاهش می‌یابد که در حالت CFC و GFG پوسته به ترتیب کمترین و بیشترین تغییرمکان‌ها را دارد. تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته در برای هر یک از حالات GFG, GFC, CFG, CFC در شکل‌های (۲۳-۲۰) نشان داده شده است. با افزایش تعداد لایه، تعداد نقاط اوج تغییرمکان مرکز پوسته ثابت خواهد بود. از طرفی پوسته در حالت GFG دارای کمترین تعداد نقطه اوج می‌باشد اما در حالت CFC دارای بیشترین تعداد نقطه اوج می‌باشد.



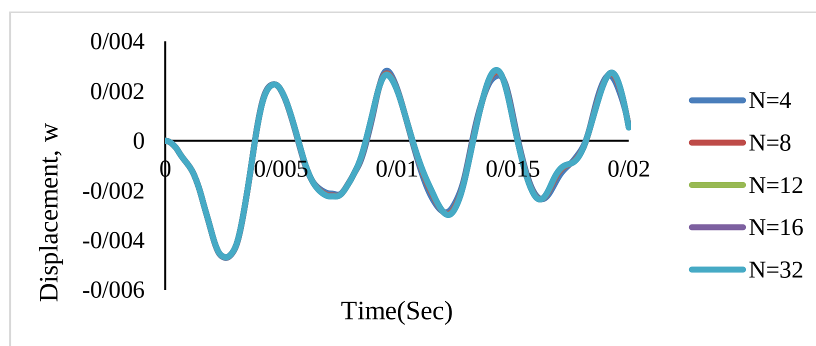
شکل ۲۰ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت CFC



شکل ۲۱ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت CFG



شکل ۲۲ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت GFC



شکل ۲۳ تاریخچه زمانی تغییرمکان غیرخطی هندسی مرکز پوسته به ازای تعداد لایه‌های مختلف در حالت GFG

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به‌منظور ارزیابی رفتار دینامیکی غیرخطی هندسی پوسته‌های استوانه‌ای مواد مرکب با هسته FGM تحت بار ضربه از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده شد. پس از اطمینان از روش مدل‌سازی پوسته‌های هدفمند و پوسته‌های مواد مرکب، عوامل اثر گذار پوسته استوانه‌ای مرکب با هسته FGM شامل شاخص توان حجمی، زوایای مختلف قرارگیری الیاف در مواد مرکب و تعداد لایه‌های مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه و ارزیابی رفتار دینامیکی پوسته‌ها به‌طور خلاصه در ادامه آمده است.

– تغییرمکان غیرخطی هندسی بیشتر از تغییرمکان خطی در مرکز پوسته می‌باشد و با افزایش شاخص توان حجمی، مقدار تغییرمکان مرکز پوسته افزایش پیدا کرده است، به‌طوری‌که بیشینه تغییرمکان در پوسته تمام فلزی ($n = \infty$) و کمینه تغییرمکان در پوسته تمام سرامیکی ($n = 0$) اتفاق افتاده است و پاسخ پوسته‌های دیگر بین این دو حالت بیشینه و کمینه قرار گرفته است از طرفی در حالت CFC و GFG پوسته به ترتیب کمترین و بیشترین تغییرمکان‌ها را دارد. به گونه‌ای که با تغییر شاخص توان حجمی از صفر (سرامیک خالص) تا بی‌نهایت (فلز خالص)، تغییر مکان در حالت CFC، ۲/۰۸ برابر در حالت CFG ۲/۵۷ برابر، در حالت GFC ۲/۶۳ برابر و در حالت GFG ۳/۵۰ برابر خواهد شد.

– با بررسی نحوه قرارگیری تک‌لایه‌ها مشاهده شد که با انتخاب $\theta = 15^{\circ}$ کمترین ماکزیمم جابه‌جایی در پوسته رخ می‌دهد و از طرفی با انتخاب $\theta = 60^{\circ}$ موجب بیشترین ماکزیمم جابه‌جایی را در پوسته خواهد شد. به گونه‌ای که با تغییر زاویه از ۱۵ درجه به ۶۰ درجه بیشینه تغییر مکان در حالت CFC ٪۱۷/۷۳ ، در حالت CFG ٪۱۴/۴۳، در حالت GFC ٪۱۱/۷۲ و در حالت GFG ٪۴/۲۷ افزایش خواهد یافت.

– با بررسی اثر تعداد لایه‌های مواد مرکب چندلایه در رویه‌های بالا و پایین پوسته مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌ها، مقدار بیشینه تغییرمکان مرکز پوسته کاهش پیدا کرده است. به طوری که با بررسی تعداد لایه‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۳۲ ملاحظه شد که کوچکترین بیشینه تغییر مکان در حالت CFC با ۳۲ لایه و بزرگترین بیشینه تغییر مکان در حالت GFG با ۴ لایه رخ می‌دهد. با تغییر تعداد لایه‌ها از ۴ به ۳۲ بیشینه تغییرمکان در حالت CFC ٪۱/۶۶ ،در حالت GFC ٪۰/۷۴ ، در حالت GFC ٪۰/۱ و در حالت GFG ٪۰/۵۳ کاهش مشاهده می‌شود.

فهرست علائم

A	طول پوسته در راستای محور x mm
b	عرض پوسته در راستای محور y، mm
h	ضخامت پوسته در راستای شعاع استوانه mm
n	شاخص توان حجمی
p_c	بیانگر خواص مواد سرامیکی
p_m	بیانگر خواص مواد فلزی
$P_s(x, y, t)$	تابع بار ضربه
$P_t(t)$	تابع بار ضربه در حوزه زمان
$P_s(x, y)$	تابع بار ضربه در حوزه مکان
t	زمان، sec
t_p	مدت زمان بارگذاری، sec
α	پارامتر شکل موج
θ	زاویه قرارگیری لایه‌ها
N	تعداد لایه‌ها

سپاسگزاری

مراجع

1. M. Bever, and P. Duwez, “Gradients in composite materials,” *Materials Science and Engineering*, vol. 10, no.7, pp. 1-8, 1972.

2. M. Koizumi, “FGM activities in Japan,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 1-4, 1997.
3. C. Horgan, and A. Chan, “The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials,” *Journal of Elasticity*, vol. 55, no. 1, pp. 43-59, 1999.
4. N. Tutuncu, and M. Ozturk, “Exact solutions for stresses in functionally graded pressure vessels,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 32, no. 8, pp. 683-686, 2001.
5. J. Seidi, “Buckling analysis of Truncated conical Sandwich Shells with FGM Face sheets using Improved Higher-order Theory,” *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 337-340, 2019.
6. Sheinman, and S. Greif, “Dynamic analysis of laminated shells of revolution,” *Journal of Composite Materials*, vol. 18, pp. 200-215, 1984.
7. R. L. Ramkumar, and Y. R. Thakar, “Dynamic response of curved laminated plates subjected to low velocity impact,” *ASME Journal of Engineering and Material Technology*, vol. 109, pp. 67-71, 1987.
8. W. S. Johnson, and M. W. Hammond, “Crack growth behavior of internal titanium plies of a fiber metal laminate,” *Composites: Part A*, vol. 39, pp. 1705–1715, 2008.
9. P. Christoforu, S. R. Swanson, S. C. Venterllo, and S. W. Beckwith, “Impact damage of carbon/epoxy composite cylinders,” *Proceeding of the 32nd international SAMPE symposium and exhibition*, vol. 32, pp. 964-973, 1987.
10. P. Christoforu, S. R. Swanson, and S. W. Beckwith, “Lateral impact of composite cylinders,” *Composite Materials: Fatigue and Fracture*, vol. 2, pp. 373-386, 1989.
11. S. Kumar, B. Nageswara Rao, and B. Pradhan, “Effect of impactor parameters and laminate characteristics on impact response and damage in curved composite laminates,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, no. 13, pp. 1273-1290, 2007.
12. S. C. Her, and Y. C. Liang, “The finite element analysis of composite laminates and shellstructures subjected to low velocity impact,” *Composite Structures*, vol. 66, no. 1, pp. 277-285, 2004.
13. H. Kiratisaevee, and W. J. Cantwell, “The impact response of aluminum foam sandwich structures based on a glass fiber-reinforced polypropylene fiber-metal laminate,” *Polymer Composite*, vol. 25, no. 5, pp. 499-509, 2004.
14. J. W. Hutchinson, and M. Y. He, “Buckling of cylindrical sandwich shells with metal foam cores,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 37, no. 46-47, pp. 6777-6794, 2000.
15. K. Garg, R. K. Khare, and T. Kant, “Higher-order closed-form solutions for free vibration of laminated composite and sandwich shells,” *Journal of Sandwich Structures & Materials*, vol. 8, no. 3, pp. 205-235, 2006.
16. O. Rahmani, S. M. R. Khalili, and K. Malekzadeh, “Free vibration response of composite sandwich cylindrical shell with flexible core,” *Composite Structures*, vol. 92, pp. 1269-1281, 2010.
17. H. Yin, L. Sun, and G. H. Paulino, “Micromechanics-based elastic model for functionally graded materials with particle interactions,” *Acta Materialia*, vol. 52, no. 12, pp. 3535- 3543, 2004.
18. H. S. Shen, *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*, CRC press, 2016. [E-book].
19. Hajlaoui, E. Triki, A. Frikha, M. Wali, and F. Dammak, “Nonlinear dynamics analysis of FGM shell structures with a higher order shear strain enhanced solid-shell element,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 14, no. 1, pp. 72-91, 2017.

20. M. S. Hoo Fatt, and D. Sirivolu, “Dynamic Stability of Double-Curvature Composite Shells under External Blast,” *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 77, pp. 281-290, 2015.
21. V. Vasilief, and V. Morozof, *Advanced Mechanics of Composite Materials*", Elservier, London, 1th ed, 2007. [E-book].
22. M. Shahraki, F. Shahabian, and M. Koohestani, “The nonlinear dynamic analysis of elasto-plastic behaviour of the single-curved FGM shells under impact load,” *AUT Journal of Civil Engineering*, vol. 4, no. 3, 2020.
23. Aksoylar, A. Ömercikoğlu, Z. Mecitoğlu, and M. H. Omurtag, “Nonlinear transient analysis of FGM and FML plates under blast loads by experimental and mixed FE methods,” *Composite Structures*, vol. 94, no. 2, pp. 731-744, 2012.
24. R. Gunes, M. Aydin, M. K. Apalak, and J. Reddy, “The elasto-plastic impact analysis of functionally graded circular plates under low-velocities,” *Composite Structures*, vol. 93, no. 2, pp. 860-869, 2011.
25. S. T. Kaneko, S. Ujihashi, H. Yomoda and S. Inagi, “Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transverse impact loading. *Thin-walled structures*,” vol. 46, no. 7-9, pp. 898-904, 2008.